

## Resumen

---

*Light Detection and Ranging* (LiDAR) es una técnica fotogramétrica y de teledetección frecuentemente utilizada para obtener con rapidez y precisión densa información 3D de la superficie terrestre. La alta densidad de información espacial tridimensional que permite capturar el sistema se utiliza en una amplia gama de aplicaciones en áreas urbanas, rurales y forestales.

En los últimos años, la tecnología LiDAR ha sido ampliamente utilizada en diferentes aplicaciones dentro de entornos urbanos tales como la actualización cartográfica, el análisis de comunicaciones, el modelado de ciudades virtuales, la evaluación de daños producidos por catástrofes naturales y la simulación de inundaciones. En todas las aplicaciones mencionadas resulta necesario detectar las distintas entidades que conforman la escena como paso previo. En este sentido, conseguir una clasificación automática es uno de los aspectos que mayor dificultad presenta debido a la gran variedad de objetos naturales y artificiales, así como estructuras de diferentes tamaños, colores, texturas y materiales existentes en áreas urbanas.

La creciente demanda de un algoritmo rápido, eficiente y automático para extraer características urbanas en tres dimensiones motivó el desarrollo de la presente tesis. Concretamente, el objetivo de la investigación es el desarrollo e implementación de algoritmos eficientes en el ámbito de la clasificación de entidades en áreas urbanas complejas que posean una dependencia mínima con respecto a los parámetros umbrales preestablecidos, con el fin de conseguir así un mayor grado de automatización y una mayor homogeneidad en los resultados. Además, el diseño de todos los algoritmos tuvo en cuenta dos premisas: la utilización únicamente de datos LiDAR sin otras fuentes de datos adicionales, así como el uso de datos LiDAR brutos dispuestos de forma aleatoria sin realizar ningún tipo de interpolación a malla regular, evitando así la pérdida de precisión asociada a la generalización de información ligada al proceso de interpolación.

Los algoritmos desarrollados abarcan la totalidad de fases propias del tratamiento y pre-procesado de datos LiDAR, desde la organización de la nube de puntos en estructuras espaciales de datos hasta la definición del vecindario, la segmentación en superficies continuas, la detección y filtrado de errores groseros y la clasificación de las distintas entidades que componen la escena. Asimismo, toda la metodología propuesta es totalmente automática y se ha implementado en C++.

El proceso de clasificación propuesto detecta un total de cuatro entidades: terreno, puentes, edificios y vegetación junto con pequeños objetos. Para identificar cada clase diferentes algoritmos han sido desarrollados y evaluados sobre dos zonas test urbanas de gran complejidad. Los datos test abarcan un área total de 1.231.095 m<sup>2</sup> y contienen edificios residenciales rodeados de vegetación, altas edificaciones, naves industriales, carreteras, puentes, canales, zonas verdes y árboles. Por lo que resultan idóneos para evaluar la dependencia de la precisión alcanzada con respecto a las características de la escena.

Para filtrar errores groseros se han desarrollado distintos algoritmos basados en el análisis del vecindario en cuanto a distribución de altitudes. En este sentido, el que obtiene mejores resultados utiliza un enfoque multiproceso con parámetros umbrales adaptativos, alcanzando una exactitud global de la clasificación del 99,9%.

El terreno es clasificado mediante un nuevo método de densificación que combina técnicas de segmentación y características propias de otros métodos como filtros morfológicos y filtros basados en interpolación de superficies. La inclusión de análisis adicionales centrados en el tamaño y posición relativa de las regiones obtenidas tras la segmentación mejora la clasificación, consiguiendo una media de errores para ambas zonas test menor al 0,5 %.

La clasificación de puentes se realiza mediante la localización de bordes y el posterior análisis direccional de la continuidad estructural. De nuevo, los mejores resultados se alcanzan al utilizar un algoritmo multiproceso con parámetros adaptativos que permite además clasificar puentes que discurren sobre agua y que por tanto son colindantes a zonas de sombra.

Para diferenciar los edificios de la vegetación y otros pequeños objetos se introduce el nuevo concepto de clasificador angular. Este clasificador analiza la distribución de los puntos de tierra en torno a pequeñas regiones todavía no clasificadas para determinar si la agrupación pertenece a un edificio o a vegetación. La clasificación más precisa se obtiene al combinar el clasificador angular con técnicas de análisis de texturas, consiguiendo una media de errores en la clase edificio que oscila entre 0,40 % y 1,52 % dependiendo de la zona test.

Los resultados experimentales confirman la alta precisión conseguida en la clasificación automática de entidades en zonas urbanas complejas. En este sentido, la presente tesis realiza distintos aportes individuales en cada uno de los ámbitos tratados. Además, cabe destacar que los resultados más precisos se obtienen al utilizar algoritmos multiproceso que ajustan automáticamente los parámetros umbrales, o bien al combinar algoritmos con enfoques distintos. Siendo este aspecto uno de los mayores aportes de la investigación.